

스튜어트 플랫폼 방식 운동재현기의 다변수 견실제어에 관한 연구

정규홍 박철규 이교일
서울대학교 대학원 기계설계학과

A Study on Robust Multivariable Control of Stewart Platform Type Motion Simulator

Gyu-Hong Jung Cheol-Geu Park Kyo-Il Lee
Dept. of Mechanical Design and Production Eng.
Seoul National University

Abstract

The Stewart platform is one example of a motion simulator which generates 6 DOF motion in space by 6 actuators connected in parallel.

The present SISO controllers are designed to track displacement command of each actuator computed from reference 6 DOF motion of platform by Stewart platform inverse kinematics.

But this type of control can't cope with external load variation, geometric configuration of motion simulator, and different dynamic behavior of 6 DOF motion. In this paper, a multivariable controller using H_{∞} optimal control theory is designed for linearized simulator model with each actuator driving force as control input and platform 6 DOF motion as measured output.

Nonlinear simulation result of the H_{∞} MIMO controller is not satisfied in steady-state characteristics. But the proposed H_{∞} + PI control scheme shows acceptable performance.

1. 서론

운동재현기(motion simulator)는 공간상에서 운용되는 장비의 운동을 재현시키는 기구로서 비행체 조종사의 조종훈련을 보다 안전하고 경제적으로 수행하거나 운동체에 탑재되는 여러장비의 개발 및 성능평가를 위한 지원장비로서 그 응용분야가 점차 확대되고 있다. 스튜어트 플랫폼(Stewart Platform)은 비행체운동을 모사하기 위하여 Stewart^[1]에 의하여 제안된 작동기구로서 공간상에서 운동하는 강체의 6 자유도운동을 병렬로 연결된 6 개의 구동 액츄에이터로서 재현시키는 병렬운동기구(in-parallel mechanism)이며 본 논문의 연구대상인 운동재현기는 핀로드 유압실린더를 액츄에이터로 사용하여 시간에 따른 배의 운동을 재현시키는 함 운동재현기(ship motion simulator)이다.

운동재현기에서 모사되는 운동상태를 실제의 모사대상 운동체에 근접시키기 위하여는 제어기에 의한 폐회로 제어시스템(closed-loop control system)의 설계가 필수적이다. 스튜어트 플랫폼 방식 운동재현기의 운동을 제어하는 기존의 방식은 모사대상 6 자유도운동으로부터 이에 해당되는 각 액츄에이터의 길이를 운동재현기의 역기구학(inverse kinematics)을 이용하여 구한후 각 액츄에이터의 변위만을 제어하는 단일입출력 제어방식(SISO control)을 택하고 있다. 그러나 운동상태에 따라 변화되는 외부부하를

고정된 부하로 가정하여 설계된 각 액츄에이터의 제어기는 대응량의 부하를 고속정밀제어하기에 어려움이 많으며 액츄에이터의 설치위치에 따라 상이하게 나타나는 6 자유도의 응답특성을 고려할수 없다. 특히 스튜어트 플랫폼의 순기구학(forward kinematics)적 성질로 인하여 측정된 각 액츄에이터의 길이정보로부터 모사되는 6 자유도운동변위의 실시간 연산이 곤란하므로 성능평가를 위하여 운동재현기에 탑재되는 개발장비로 안정화(stabilization) 설계에 필수적인 운동재현기의 실제 운동상태정보를 넘겨줄수 없다는 단점이 있다.

본 논문에서는 스튜어트 플랫폼 방식 운동재현기를 고속정밀 제어하기 위하여 운동상태에 따라 변화되는 외부부하변동 및 상이한 6 자유도응답특성을 고려한 다변수제어기를 외란에 강인한 제어설계기법인 H_{∞} 최적제어이론을 적용하여 설계하였으며 시뮬레이션을 통하여 성능검증 및 적용가능성을 확인하였다. 그림 1 은 단일입출력제어기에 의한 제어방식과 다변수제어기에 의한 제어방식을 나타내는 블록선도(block diagram)이다.

2. 좌표계정의 및 벡터변환

그림 2 는 하부에 고정되어있는 베이스(basc), 6 자유도 운동을 재현시키는 플랫폼(platform)과 6 개의 실린더로 구성되는 운동재현기의 도식적 구조이다. 베이스에 고정된 직각좌표계를 B_{xyz} , 플랫폼에 고정된 직각좌표계를 P_{xyz} 이라하면 플랫폼의 6 자유도변위는 다음과같이 정의된다.

• 선형변위

플랫폼좌표계의 원점 P가 B_{xyz} 좌표계에 대하여 X 축으로 이동된 거리를 Surge, Y 축으로 이동된 거리를 Sway, Z 축으로 이동된 거리를 Heave 라 정의한다.

• 회전각변위

베이스좌표계의 원점 B가 플랫폼좌표계의 원점 P와 일치된 상태에서 X 축에 대한 회전각변위를 Roll, Y 축에 대한 회전각변위를 Pitch, Z 축에 대한 회전각변위를 Yaw 라 정의하며 회전각변위의 발생순서는 기술된 순서와 같다. (그림 3 참조)

이상과같이 플랫폼의 6 자유도변위 정의에 따라 B_{xyz} 좌표축과 P_{xyz} 좌표축 사이의 벡터관계식은 다음과 같다.^[2]

$$\vec{r} = R_{BP}^* + \vec{r}_{PORG} \quad (1)$$

여기서 $R_B^P: B_{XYZ}$ 좌표축과 P_{xyz} 좌표축 사이의 회전변환행렬
($=\text{Rot}(X,r)\text{Rot}(Y_1,p)\text{Rot}(Z_2,y)$)

$$\vec{b}_{\text{FORG}}: \text{선형변위벡터} \\ (= [\text{Sg Sw He}]^t)$$

베이스와 플랫폼을 연결하는 실린더를 하나의 직선으로 생각하면 이들의 위치는 직선좌표계의 하나인 Plücker 좌표계로 나타내는 것이 편리하다.^[3] 즉 \vec{Q}_1 과 \vec{Q}_2 가 서로 다른 벡터라고 가정하면 $\vec{S}' = \vec{Q}_1 - \vec{Q}_2$

$$\vec{M}' = \vec{Q}_1 \times \vec{Q}_2 = \vec{Q}_1 \times \vec{S}' = \vec{Q}_2 \times \vec{S}' \quad (2)$$

(2)식으로부터 Plücker 좌표계는 (3)식으로 정의되며

$$\vec{U}' = [S_x' S_y' S_z' M_x' M_y' M_z']^t \quad (3)$$

정규화된 Plücker 좌표계는 (4)식과 같다.

$$\vec{U} = [S_x S_y S_z M_x M_y M_z]^t \quad (4)$$

$$\text{여기서 } \vec{S} = \vec{S}' / |\vec{S}'|, \quad \vec{M} = \vec{M}' / |\vec{S}'|$$

3. 플랫폼 운동방정식 및 선형화모델

각 실린더가 플랫폼에 미치는 힘 f_i 에 의하여 발생하는 플랫폼의 6 자유도운동은 플랫폼의 동특성 방정식으로 기술된다. 그림 4 는 플랫폼의 자유물체도를 나타내며 플랫폼에 작용하는 외력으로는 각 실린더의 구동력 f_i 와 플랫폼 자중에 의한 중력 F_G 가 존재한다. 각 실린더의 질량을 무시하면 베이스좌표계로 기술되는 플랫폼의 힘평형방정식은 (5)식과 같다.

$$m\vec{a} = \text{BS}^*F + m\vec{b}_g \quad (5)$$

여기서 m : 플랫폼의 질량

$$\vec{b}_g: \text{베이스좌표계로 기술되는 중력벡터}(=[0 \ 0 \ -g]^t) \\ \text{BS}^*: \text{각행이 실린더의 정규화된 방향벡터로 구성되는} \\ \text{3x6 행렬} \\ (= [\text{BS}_1 \ \text{BS}_2 \ \text{BS}_3 \ \text{BS}_4 \ \text{BS}_5 \ \text{BS}_6])$$

$$F: \text{각 실린더에서 플랫폼에 미치는 힘} \\ (= [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5 \ f_6]^t)$$

$$\vec{a}: \text{베이스좌표계로 기술되는 플랫폼의 가속도벡터} \\ (= [\text{Sg Sw He}]^t)$$

플랫폼의 회전운동을 기술하는 모멘트 평형방정식은 플랫폼좌표계의 원점을 기준으로하여 나타내면 다음식과 같다.

$$\vec{P}\vec{M}^*F = (\vec{P}\vec{H}_G)\vec{G}_{xyz} + \vec{P}\vec{\omega}_G \times \vec{P}\vec{H}_G \quad (6)$$

여기서 $(\vec{P}\vec{H}_G)\vec{G}_{xyz}$: 플랫폼좌표계에 대한 각운동량의 변화량
($= I_p \vec{P}\vec{\omega}_p$)

$$\vec{P}\vec{H}_G: \text{플랫폼의 각운동량}(= I_p \vec{P}\vec{\omega}_p)$$

I_p : 플랫폼의 회전관성모멘트(moment of inertia) 행렬

$$\vec{P}\vec{M}^*: \text{각 행이 실린더의 정규화된 모멘트벡터로 구성} \\ \text{되는 3x6 행렬} \\ (= [PM_1 \ PM_2 \ PM_3 \ PM_4 \ PM_5 \ PM_6])$$

$$\vec{P}\vec{\omega}_p: \text{플랫폼좌표계로 기술되는 플랫폼의 회전각속도} \\ (= [P\omega_{px} \ P\omega_{py} \ P\omega_{pz}]^t)$$

선형제어이론인 H_∞ 최적제어기법을 이용하여 플랫폼의 운동을 재현시키려면 (5)식과 (6)식으로 표현되는 플랫폼의 운동방정식으로부터 선형화된 상태방정식을 도출하여야 한다. 비선형시스템의 운동방정식은 Taylor 급수전개를 통하여 선형화되며 선형화의 기준이 되는 작동점은 플랫폼이 초기위치에서 정적평형을 이루고 있을때의 상태변수와 제어입력으로 선정하였다. 플랫폼의 6 자유도운동은 외력 f_i 에 의하여만 발생되며 등가의 점성마찰과 스

프링작용력을 무시하면 선형화된 플랫폼의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\text{Surge 운동: } m\dot{\text{Sg}} = \sum_{i=1}^6 \frac{-\text{B}BP_{ix} + \text{P}PP_{ix}}{l_0} \Delta f_i \quad (7)$$

$$\text{Sway 운동: } m\dot{\text{Sw}} = \sum_{i=1}^6 \frac{-\text{B}BP_{iy} + \text{P}PP_{iy}}{l_0} \Delta f_i \quad (8)$$

$$\text{Heave 운동: } m\dot{\text{He}} = \sum_{i=1}^6 \frac{\text{H}gz}{l_0} \Delta f_i \quad (9)$$

$$\text{Roll 운동: } I_{p_{xx}} \ddot{r} = \sum_{i=1}^6 \frac{\text{P}PP_{iy} \text{H}gz}{l_0} \Delta f_i \quad (10)$$

$$\text{Pitch 운동: } I_{p_{yy}} \ddot{p} = \sum_{i=1}^6 \frac{\text{P}PP_{ix} \text{H}gz}{l_0} \Delta f_i \quad (11)$$

$$\text{Yaw 운동: } I_{p_{zz}} \ddot{y} = \sum_{i=1}^6 \frac{\text{P}PP_{iy} \text{H}BP_{ix} - \text{P}PP_{ix} \text{H}BP_{iy}}{l_0} \Delta f_i \quad (12)$$

(7)식 - (12)식으로부터 입력변수로 플랫폼에 작용하는 구동력 Δf_i 를 택하고 출력변수를 플랫폼의 6 자유도변위로 정하면 상태방정식은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \\ I_{6 \times 6} & 0_{6 \times 6} \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} b_{ij}, i,j=1-6 \\ 0_{6 \times 6} \end{bmatrix} \\ C = [0_{6 \times 6} \ | \ I_{6 \times 6}] \\ D = 0_{6 \times 6}$$

4. 다변수제어기 설계

그림 5 는 표준문제(standard problem)의 블록선도와 운동제현기에 적용하고자하는 견실성과 성능안정도문제의 블록선도를 나타낸다. 그림 5(a) 의 표준문제는 외부입력신호(w)로부터 제어변수(z) 까지의 H_∞ -norm 을 최소화하는 제어기 K(s) 의 설계문제이며 그림 5(b) 는 플랫폼 6 자유도변위의 기준입력(r_1) 으로부터 가중함수가 곱하여진 오차신호(e_c) 와 가중함수가 곱하여진 출력신호(y_c) 사이의 전달함수, 즉 가중함수 $W_1(s)$ 와 $W_2(s)$ 가 곱하여진 sensitivity function S(s) 와 complementary sensitivity function T(s) 의 H_∞ -norm 을 동시에 최소화하는 설계문제이다.

본 연구에서는 안정된 6 자유도변위 제어성능과 외란제거 성능이 우수한 운동재현기의 다변수제어기 설계를 위하여 설계목적에 따라 주파수영역에서 표현되는 가중함수 $W_1(s)$, $W_2(s)$ 를 S(s) 와 T(s) 에 대하여 설계한후 $W_1(s)S(s) + W_2(s)T(s)$ 의 H_∞ -norm 을 최소화하는 문제를 표준문제로 바꾸어 K(s) 를 구하였다. 그림 5(a) 에서 일반화된 플랜트의 전달행렬을 다음식과같이 정의하면 견실성과 성능 안정도문제는 등가의 표준문제로 변환된다.^{[4][5]}

$$P_{11} = \begin{bmatrix} W_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad P_{12} = \begin{bmatrix} -W_1G \\ -W_2G \end{bmatrix}, \quad P_{21} = I, \quad P_{22} = -G \quad (14)$$

(15)식은 운동재현기의 제어기설계를 위하여 선정된 가중함수 $W_1(s)$, $W_2(s)$ 이다.

$$W_1(s) = w_1(s)I_6, \quad W_2(s) = w_2(s)I_6 \quad (15)$$

$$\text{여기서 } w_1(s) = \frac{\gamma(s + \omega_{c2})}{(s + \omega_{c1})^2} \\ w_2(s) = \frac{s}{100(\tau s + 1)}$$

운동재현기의 입력과 출력은 각각 6 개이므로 가중함수는 6x6 전달행렬이어야 한다. (15)식과같이 가중함수 $w_1(s)$ 를 선정하면 저주파영역에서 S(s) 에 40dB/decade 의 가중치가 주어지므로 경사신호의 기준입력에 대하여도 정상상태오차 없이 수렴하게되며 ω_{c2} 는 S(s) 의 감쇄비rolloff magnitude) 가 바뀌는 주파수를 결정하고 γ 는 $w_2(s)$ 와 더불어 폐회로 전달함수의 주파수대역을 결

정한다. ω_{c1} 은 매우 낮은 주파수영역에서 $w_1(s)$ 를 일정한 크기로 만들어 주기위한 값이고 τ 는 가중함수 $w_2(s)$ 가 proper 하도록 설정된 시상수(time constant)이다.

본 연구에서는 (14)식과 (15)식으로 표현된 등가의 표준문제를 두개 Riccati 방정식 해를 구하여 $\|T_{zw}\|_{\infty}$ 을 최소화하는 제어기 $K(s)$ 의 설계방법인 Doyle 의 이론을 적용하여 해결하였다.⁶⁾ Doyle 의 이론을 (13)식의 운동제현기에 적용하려면 A 행렬은 허수축에 고유치를 갖지 않아야하며 D 행렬은 영이 아니어야하므로 선형화된 플랫폼의 동특성을 크게 변화시키지 않으면서 H_{∞} 최적제어기 설계조건을 만족시키기 위하여 변형시킨 플랫폼의 시스템행렬은 다음과 같다.

$$\tilde{A} = A + \delta_1 I \quad (16)$$

$$\tilde{D} = \delta_2 I \quad (17)$$

이와같이 변형된 플랫폼의 상태방정식으로부터 $S(s)$ 의 가중함수 $w_1(s)$ 의 γ 값을 증가시키면서 H_{∞} 제어기의 조건을 만족하는 γ 의 최대값을 택하여 H_{∞} 최적제어기를 설계하였다. 그림 6은 설계된 H_{∞} 최적제어기를 적용하였을때 $S(s)$ 와 $T(s)$ 의 특이치 선도(singular value bode plot)를 나타내며 그림 7은 선형화모델에 대하여 0.1 m의 Surge 운동을 기준입력으로 인가하였을때의 응답특성을 나타낸다. 운동제현기 6 자유도의 입출력선도가 모두 동일하므로 6 자유도 운동은 모두 동일한 응답특성을 나타내며 Surge 운동으로 인하여 발생하는 간섭현상은 전혀 나타나지 않았다.

5. 시뮬레이션

설계된 H_{∞} 제어기의 성능특성과 모델오차에대한 견실성을 검증하기위하여 운동제현기의 비선형모델에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 비선형 시뮬레이션의 결과와 선형모델과의 상이한 응답특성 원인을 보다 용이하게 규명하기위하여 운동제현기의 비선형모델을 액츄에이터의 동특성포함여부여따라 두 경우로 선정하였다.

1) 편로드 유압실린더의 특성이 무시된 비선형모델의 경우

편로드 유압실린더의 동특성이 무시되므로 H_{∞} 최적제어기의 출력인 힘명령(force command)이 직접 플랫폼에 작용하게된다. 그림 8은 기준입력으로 Surge 운동만을 0.1 m 변위의 계단입력, 경사입력을 인가하였을 경우의 결과이다. Surge 운동의 계단입력응답은 과도응답상태에서는 선형시스템의 결과와 잘 일치하나 정상상태에서의 수렴성능이 불안하며 경사입력시에는 정상상태오차가 영으로 수렴하므로 가중함수를 설계한 목적과 일치하나 시간이 지날수록 다른운동이 발생하는 간섭현상이 서서히 나타나기 시작한다.

2) 편로드 유압실린더의 특성이 고려된 비선형 모델의 경우

H_{∞} 다변수제어기의 출력인 힘명령을 추종하는 부 제어기(subcontroller)는 정상상태에서의 응답특성보다 빠른 과도응답특성이 요구되므로 고이득(high gain)의 비례제어기로 설계하였다. 그림 9에서 알수있듯이 Surge 운동은 정상상태에서 발산되는 결과를 나타내며 다른 선형운동의 간섭현상도 크게 발산함을 알수있다. 이러한 결과는 상대적으로 큰 시상수를 갖는 서보밸브 동특성으로 인하여 초기 발진시 필요로하는 구동력을 충분히 발생시켜주지 못할뿐 아니라 플랫폼의 위치에따라 변

화되는 각 실린더의 평형력이 선형화의 기준이되는 작동점에서의 평형력과 다르기때문이다.

6 H_{∞} + PI 제어기법

H_{∞} 다변수제어기는 과도응답상태는 양호하나 정상상태에서의 수렴성능이 불안정하므로 플랫폼의 특정위치에서 각 실린더에 필요한 정적인 힘(static force)을 제어기에서 발생시킬수 있도록 H_{∞} 다변수제어기와 각 실린더의 길이오차에따라 힘 신호를 내보내는 PI 제어기를 병렬로 설계하였다. 그림 10은 H_{∞} + PI 제어기의 블럭선도를 표시하며 계단입력과 경사입력시 발생하는 6 자유도 변위의 응답을 그림 11에 나타내었다. Surge 운동의 계단입력응답특성은 정상상태에서 매우 양호하게 수렴하며 Surge 운동에의해 발생하는 다른변위도 기준입력의 부호가 변화되는 순간 다소 발생하나 곧 영으로 수렴하였다.

7. 결론

본 연구에서는 스투어트 플랫폼방식 함운동제현기의 운동을 보다 효과적으로 제어하기위하여 H_{∞} 최적제어이론을 이용하여 설계된 다변수제어기를 적용하였으며 주요 연구결과는 다음과 같다.

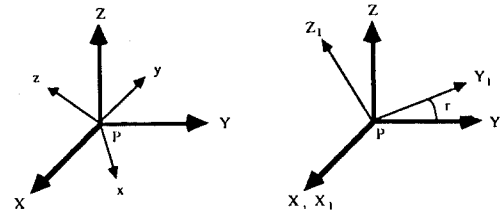
- 1) 플랫폼의 비선형방정식으로 부터 선형이론의 적용이 가능한 선형모델을 정립하였다.
- 2) 운동제현기의 동특성이 고려된 제어성능과 설계된 주파수대역에서의 외란제거성능이 우수하도록 적절한 가중함수를 선정하여 다변수제어기를 설계하였다.
- 3) H_{∞} 다변수제어기는 우수한 과도응답특성을 나타내었으나 서보밸브 동특성, 작동점과 상이한 특정위치에서의 실린더 평형력, 회전각변위의 비선형성등으로 인하여 정상상태 수렴성능이 불안정하였다.
- 4) 정상상태에서의 응답특성향상을 위하여 제안된 H_{∞} + PI 제어기는 정상상태에서 각 액츄에이터가 필요로하는 정적인 힘이 PI 제어기에서 발생되므로 정상상태오차가 발생하지 않았으며 과도응답특성은 H_{∞} 제어기의 경우와 유사하였다.
- 5) H_{∞} 다변수제어기의 입력신호인 플랫폼의 6 자유도변위는 측정된 각 실린더의 길이를 이용하여 실시간 추정하는 기법⁷⁾에 의하여 획득가능하므로 본 연구에서 제안된 H_{∞} + PI 제어기법은 실제 운동제현기에 적용하여 향상된 성능을 얻을수 있으리라 예상된다.

[Rererence]

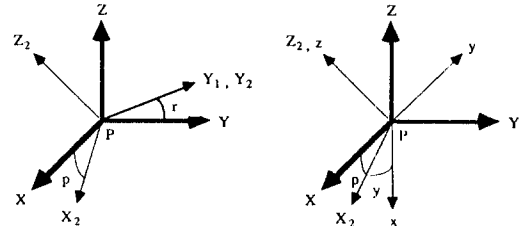
1. Stewart, D., "A platform with six degrees of freedom," Proc. of the Institute of Mechanical Engineers, vol.180, part 1, no.15, pp.371-386, 1965-66.
2. Craig, J.J., *Introduction to Robotics*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1986.
3. Fitcher, E.F., "A Stewart Platform-based manipulator: General theory and practical construction," Int. J. Robotics Research, vol.5, no. 2, pp. 157-182. 1986.
4. Francis, B.A., *A Course in H_{∞} Control Theory*, Lecture Notes in Control

and Information Sciences, vol.88, Springer-Verlag, New York, 1987.

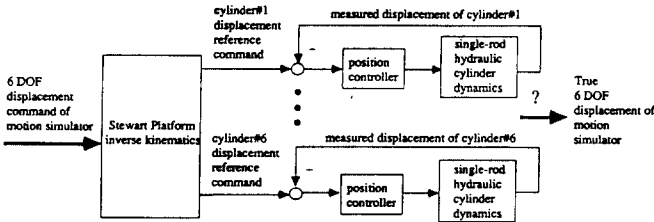
5. Maciejowski, J.M., *Multivariable Feedback Design*, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1989.
6. Doyle, J.C., G. Keith, P.P. Khargonkar, and B.A. Francis, "State-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems," *IEEE Trans. Auto. Contr.*, vol.34, no.8, pp.831-847, 1989.
7. 정규홍, 박철규, 이교일, "스튜어트 플랫폼 6 자유도변위의 실시간 추정기법," *대한기계학회 춘계학술대회 초록집*, vol.1, pp.669-673, 1992.



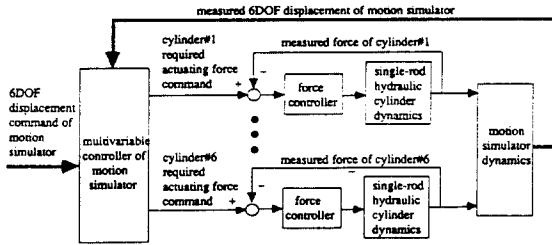
(a) 선형운동후 B 점과 P 점이 일치된 상태 (b) Roll 운동



(c) Pitch 운동 (d) Yaw 운동



(a) 단일입출력제어기이여한 제어방식



(b) 다변수제어기이여한 제어방식

그림 1 스튜어트 플랫폼 운동재현기의 제어방식

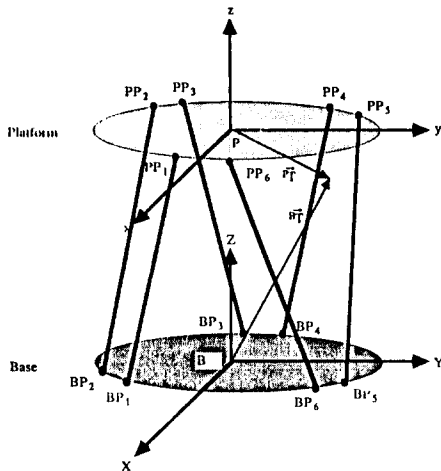


그림 2 스튜어트 플랫폼(Stewart Platform)

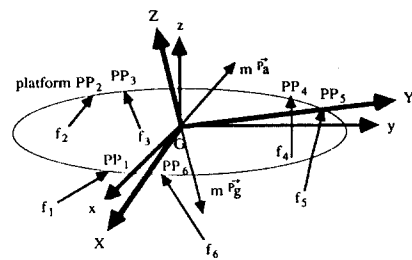
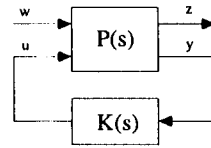


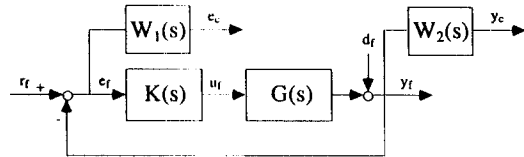
그림 4 플랫폼의 자유물체도



$$\begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix}$$

w : exogenous signal
u : control input
z : controlled variable
y : measured variable

(a) 표준문제(standard problem)



rf : 6 DOF reference input
ur : platform actuating force
yf : 6 DOF displacement output
cf : weighted 6 DOF error
yc : weighted 6 DOF output
df : output disturbance

(b) 건설성과 성능 안정도문제

그림 5 다변수제어기의 설계문제

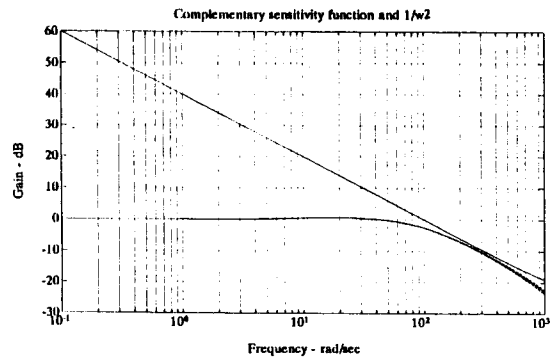
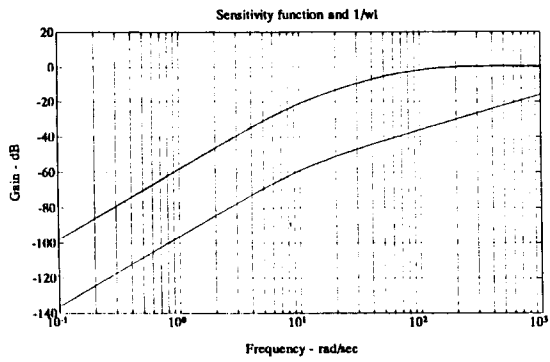


그림 6 S(s) 와 T(s)의 특이치선도(singular value bode plot)

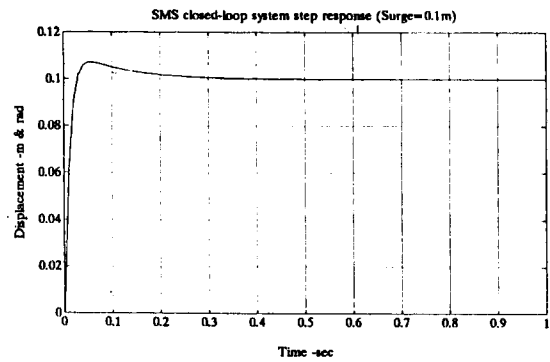
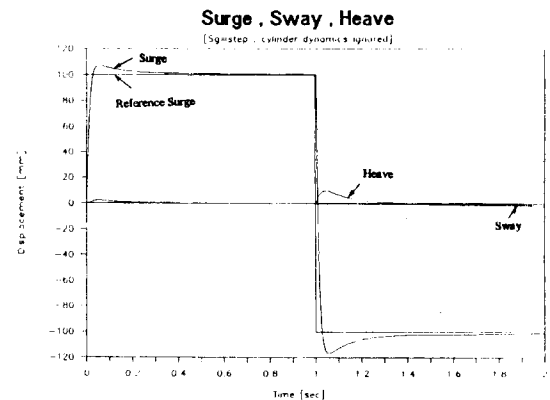
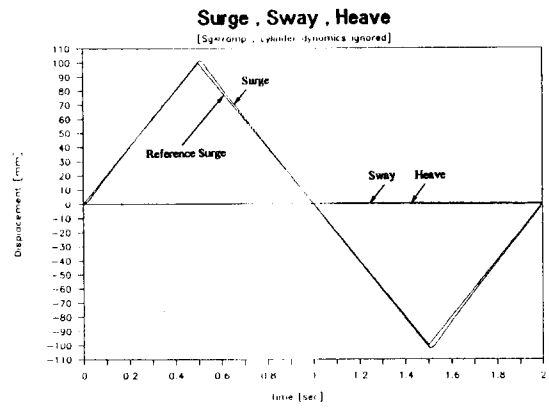


그림 7 선형시스템의 응답특성 (기준입력 : 0.1 m 변위의 Surge 계단입력)



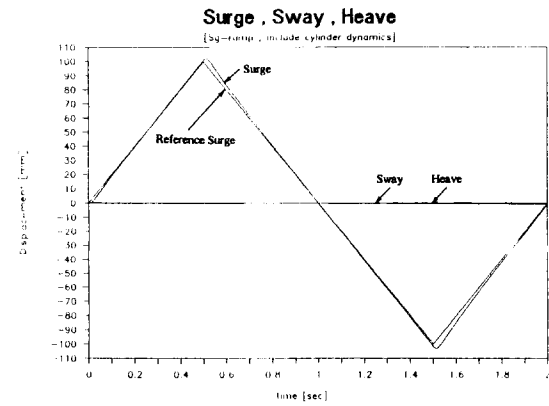
(a) Surge, Sway, Heave (기준입력 : 0.1 m 변위의 Surge 계단입력)



(b) Surge, Sway, Heave

(기준입력 : 0.1 m 변위의 Surge 경사입력)

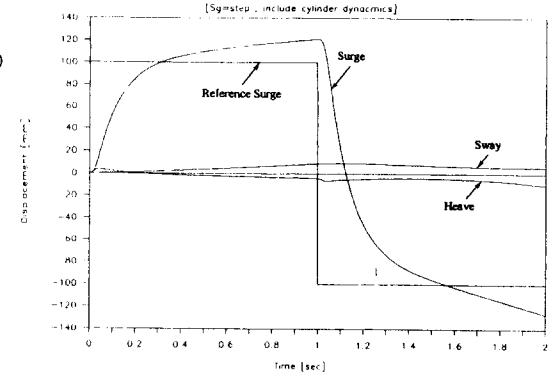
그림 8 비선형 시뮬레이션 결과 (압력동특성이 무시된 경우)



(a) Surge, Sway, Heave

(기준입력 : 0.1 m 변위의 Surge 계단입력)

Surge, Sway, Heave



(b) Surge, Sway, Heave

(기준입력 : 0.1 m 변위의 Surge 경사입력)

그림 9 비선형 시뮬레이션 결과 (압력동특성이 고려된 경우)

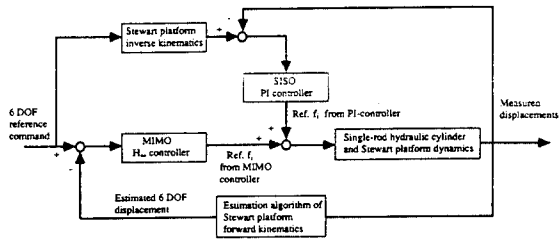
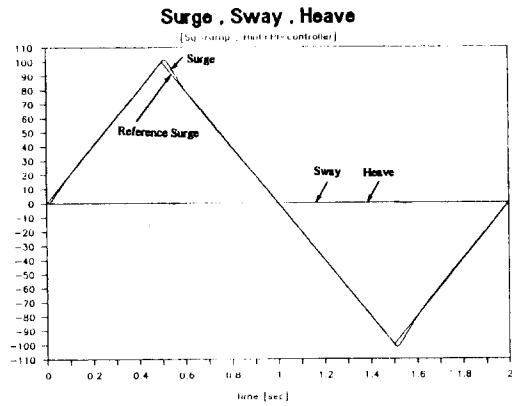
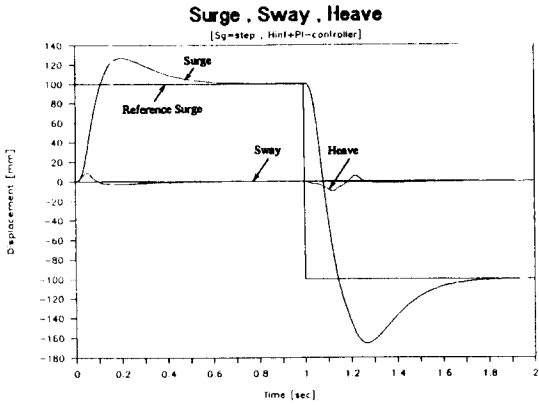


그림 10 H_{∞} + PI 제어기의 블럭선도



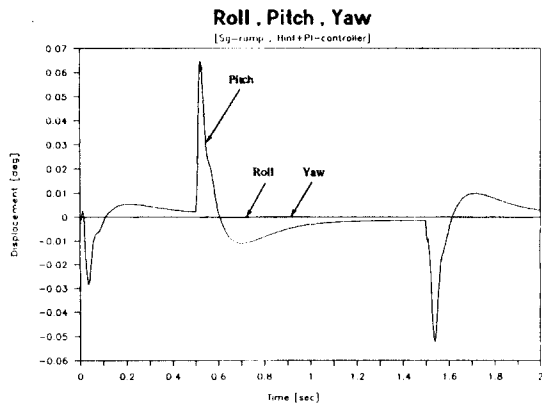
(c) Surge, Sway, Heave

(기준입력 : 0.1 m 변위의 Surge 경사입력)



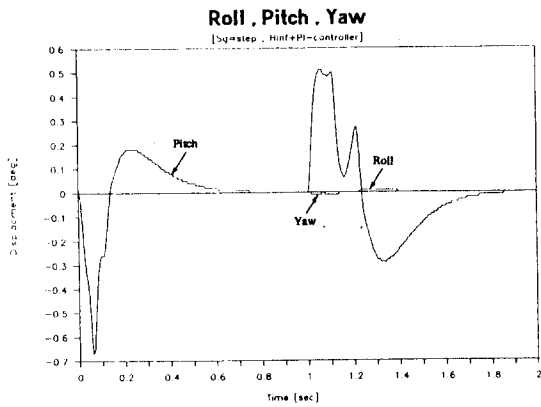
(a) Surge, Sway, Heave

(기준입력 : 0.1 m 변위의 Surge 계단입력)



(d) Roll, Pitch, Yaw

(기준입력 : 0.1 m 변위의 Surge 경사입력)



(b) Roll, Pitch, Yaw

(기준입력 : 0.1 m 변위의 Surge 계단입력)

그림 11 H_{∞} + PI 제어가 적용된 비선형시스템의 시뮬레이션 결과